

DOI: 10.15593/24111678/2016.04.04

УДК 624.139(571.1/.5)

В.Г. Жубрин¹, С.П. Ереско¹, С.И. Васильев²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НЕОДНОРОДНЫХ СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Исследованы характеристики сезонномерзлых грунтов в части распределения фракционного состава, влажности и температуры в условиях естественного промерзания. Выполнен детальный анализ частоты встречаемости включений в грунтах, по каждому из расчетных случаев приведено описание. Доказано, что законы распределения гравийно-галечниковых включений в грунтах северной и южной зон Красноярского края и в грунтах Республики Саха одинаковы, но существенно отличаются от закона распределения гравийно-галечниковых включений в грунтах Республики Бурятия, Иркутской области и зоны БАМа. Исследования авторов показали, что размеры включений в грунтах разбиты на десять интервалов, при этом в грунтах Восточно-Сибирского региона включения с первой по третью группу малопредставительны. Произведено условное разделение температурных условий промерзания грунтов на пять режимов, для каждого из которых определены пределы температур. Сделан акцент на то, что не температура промерзания грунта, не влажность грунта и не гранулометрический состав определяют трудность разработки грунта, а комплекс перечисленных вероятностных условий. Рассмотрены пределы изменения весовой влажности в сезонномерзлой глине, суглинке и супеси. Получены уравнения изменения температуры грунта по глубине при промерзании. Установлены аналитические зависимости изменения температуры грунта. От глубины промерзания меняется и закон изменения, в частности при промерзании в период с начала октября до середины декабря.

Ключевые слова: мерзлые грунты, землеройные машины, плотность распределения, влажность грунта, включения, температура.

V.G. Zhubrin¹, S.P. Eresko¹, S.I. Vasil'ev²

¹Siberian State Aerospace University named after Academician
M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

RESEARCH OF INHOMOGENEOUS GRANULOMETRIC STRUCTURE OF SEASONALLY FROZEN GROUND OF THE EAST SIBERIAN REGION

Characteristics of seasonal and frozen soil are investigated, carried out to parts of fractional structure, distribution of humidity and temperature in the conditions of natural frost penetration. Detailed analysis of the frequency of occurrence of inclusions in the ground for each of the estimated cases are described. It is proved that an important indicator of the test soil is likely to have a background in the prepared frozen ground of a certain size fraction and the law of distribution of size fractions. It is proved

that the laws of the distribution of gravel and pebble inclusions in the soils of the northern and southern areas of the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Sakha soils are the same, but differ substantially from the distribution law and pebble inclusions in the soil of the Republic of Buryatia, the Irkutsk region and the BAM zone. Research authors have shown that the size of the inclusions in the ground divided into ten intervals, while in soils of the East-Siberian region turn first to third group are few personable. Produced conditional decomposition temperature conditions of soil freezing on the five modes, each of which are defined outside temperatures. Emphasis is placed on the fact that not the temperature of soil freezing and soil moisture and particle size distribution determined by each individual challenge and excavation, and these complex probabilistic terms. We consider the range of variation in the weight of moisture seasonally frozen clay, loam and sandy loam. The equations of soil temperature changes in depth during freezing. Established analytical dependences of soil temperature on the depth of frost penetration and changing the law changes, in particular the freezing during the period from early October to mid-December.

Keywords: frozen ground, earthmoving machinery, distribution density, soil moisture, inclusion, temperature.

Данные, полученные от строительных организаций, показывают, что более 60 % земляных работ выполняется в зимний период года [1–5]. Грунты Восточной Сибири представлены большим разнообразием по гранулометрическому составу, при этом значительные объемы грунта представлены грунтами с включениями, но все их объединяет одна характеристика – низкая температура в течение длительного времени, не ограничивающегося, как правило, зимним периодом. Практика разработки грунтов имеет немало примеров обнаружения островной мерзлоты в начальный период лета и раннего промерзания грунта в начале осени. По гранулометрическому составу твердых скелетных частиц в этом регионе преобладают глинистые породы, песчаники и горные породы, находящиеся в состоянии от вечномерзлого до талого, а также неоднородные мерзлые грунты – грунты с наличием каменистых включений, размеры которых в несколько раз больше, чем фракции скелета грунта [6, 7]. Преимущественно мерзлые грунты Сибири представлены супесчаными и суглинистыми грунтами [8, 9]. Вероятность их встречаемости равна 0,39 и 0,25 соответственно. Вероятность (p_i) встречаемости скальных грунтов – не более 0,015, вероятность встречаемости глинистых грунтов достигает 0,13.

По частоте встречаемости и размерам включений в грунтах Восточной Сибири выделено пять расчетных случаев [10, 11].

Первый расчетный случай включает грунты, имеющие в своем составе твердые частицы, размер которых не более 10 мм. Размеры таких включений не оказывают влияния на прочность разрабатываемых грунтов.

Второй расчетный случай включает грунты, имеющие в составе включения от 10 до 30 мм. Масса таких включений в грунтах варьируется от 7 до 35 %. Как правило, включения не представляют собой от-

дельный массив и распределены равномерно в грунте. Данный расчетный случай характеризуется тем, что включения влияют на прочность мерзлого грунта.

Для третьего расчетного случая характерно наличие в грунте каменных включений размером от 30 до 40 мм, существенно влияющих на прочность мерзлого грунта.

Четвертый расчетный случай – наличие в грунте валунов, размеры которых составляют от 80 до 200 мм. Такие грунты относятся к категории не подлежащих разработке в мерзлом состоянии без предварительного разупрочнения методом утепления, разогрева или механического воздействия.

Наличие в грунте крупнообломочных включений размером более 200 мм отнесено к пятому расчетному случаю.

Установлено также, что частота встречаемости и вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах Восточно-Сибирского региона подчиняются закону распределения Пуассона [12–14].

Важными показателями исследуемого грунтового фона являются вероятность наличия в разрабатываемом мерзлом грунте определенного размера фракции и закон распределения фракций по размерам. Закон распределения гравийно-галечниковых включений в грунтах северной и южной зон Красноярского края и в грунтах Республики Саха одинаков, но существенно отличается от закона распределения гравийно-галечниковых включений в грунтах Республики Бурятия, Иркутской области и зоны БАМа. Исследования показывают, что размеры включений в грунтах поделены на десять интервалов, при этом в грунтах Восточно-Сибирского региона включения с первой по третью группу малопредставительны [15].

Вероятность встречаемости фракций размером от 0,1 до 70 мм равна 0,95, при этом суммарная вероятность наличия в мерзлом грунте фракций размером от 0,1 до 0,25 мм и от 0,25 до 0,5 мм составляет 0,349. Вероятность наличия в грунте фракций от 2 до 10 мм составляет 0,253, а вероятность появления в разрабатываемых мерзлых грунтах фракций, размер которых от 10 до 30 мм, составляет 0,148.

Следует оговориться, что приведенное деление грунтов на категории имеет условный характер применительно к имеющимся методам разработок их в мерзлом состоянии и при естественной влажности грунта. При равных температурах грунтов и их гранулометрических составах важной характеристикой исследуемой среды является влажность.

Участки с переувлажнением, к которым относятся низменные участки при том же гранулометрическом составе, при тех же размерах включений, следует отнести к расчетным случаям большего порядкового номера.

Весовая влажность крупного и мелкого песка с доверительной вероятностью 0,74 имеет значения 12 и 8 % соответственно.

Показатели весовой влажности мерзлых глин, суглинков, супеси с доверительной вероятностью 0,74 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Распределение весовой влажности в сезонномерзлой глине и суглинке

Тип грунта	Глина тяжелая		Глина		Суглинок мелкий	Суглинок средний	Суглинок тяжелый
	min	max	min	max			
Весовая влажность, %	25	45	20	26	13	16	20

Таблица 2

Распределение весовой влажности в сезонномерзлой супеси

Тип грунта	Супесь тяжелая крупная		Супесь легкая крупная		Супесь тяжелая мелкая		Супесь легкая мелкая
	min	max	min	max	min	max	
Весовая влажность, %	16	20	13	16	11	15	9

Температурные условия являются наиболее полно изученным фактором состояния грунтов. Статистические исследования, выполненные на протяжении нескольких десятилетий, позволяют не только определить граничные значения температуры грунта, но и указать относительную величину объемов разработки мерзлых грунтов [16]. Значительные объемы (около 50 %) по разработке проводятся в талом состоянии грунта, отрицательные температуры отсутствуют по всей глубине залегания. Это характерно как для Красноярского края, так и для Иркутской области. Такое состояние грунта отнесено к первому температурному состоянию грунта (T_1), второе температурное состояние грунта (T_2) характеризуется промерзанием грунта на глубину до 1,2 м, третье – промерзанием на глубину до 2,5 м, четвертое – промерзанием на глубину свыше 2,5 м. Кроме указанных расчетных распределений, выявлено и пятое температурное состояние грунта, когда мерзлый грунт находится под слоем талого.

Установлено, что в зависимости от глубины промерзания меняется и закон изменения температуры грунта, в частности при промерзании до 0,4 м, что характерно для периода с начала октября до середины декабря. Уравнение имеет вид

$$T = 0,14391\ell^{(t + 5,05037)^2/15,39037}$$

При промерзании грунта на глубину до 1 м, изменение температуры грунта подчиняется закону

$$T = 0,18377\ell^{(t + 2,65743)^2/9,438}$$

При промерзании грунта на большую глубину закон изменения температуры грунта подчиняется одному из вышеописанных законов (T_i) и зависит от зоны расположения (табл. 3).

Таблица 3

Распределение отрицательных температур и прочности мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона

Исследуемая зона	Температурный режим	Распределение отрицательных температур t по глубине H
Красноярский край (северная зона)	T_2	$t = -5,9 + 8,7H - 2,8H^2$
	T_3	$t = -10,8 + 10,5H - 2,6H^2$
	T_4	$t = -9,7 + 7,6H - 1,6H^2$
Республика Саха	T_4	$t = -12,5 + 10,1H - 2,1H^2$
Республика Бурятия	T_2	$t = -8,1 + 16,3H - 7,7H^2$
Иркутская область	T_2	$t = -8,7 + 18,1H - 8,5H^2$
	T_3	$t = -5,2 + 5,7H - 1,4H^2$
БАМ	T_2	$t = -6,3 + 8,9H - 3,2H^2$
	T_3	$t = -12,9 + 10,7H - 2,2H^2$
	T_4	$t = -1,5 + 11,3H - 1,8H^2$

Изучение грунтовых условий эксплуатации машин имеет первостепенное значение при проектировании перспективной землеройной техники.

Несмотря на то что в настоящее время создано довольно большое количество машин для разработки мерзлых грунтов, лишь отдельные из них способны удовлетворительно работать в районах Сибири и Севера России. В большей степени это объясняется своеобразием грунтовых условий, характеризующихся обширными заболоченными участками, широким распространением вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов с каменистыми включениями.

В результате проведенного исследования можно прийти к следующим выводам:

1. По количеству фракций гравийно-галечниковых включений и частоте их встречаемости грунты Восточной Сибири разделяются на два кластера:

– грунты Красноярского края, включающие северную и южную зоны, и Республики Саха;

– грунты Республики Бурятия, Иркутской области и зоны БАМа.

2. Установлено, что вероятность распределения гравийно-галечниковых включений по фракционному составу и частоте встречаемости числа фракций в разрабатываемых мерзлых грунтах Восточно-Сибирского региона подчинена законам распределения Пуассона.

Список литературы

1. Недорезов И.А. Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 4. – С. 43–44.

2. Недорезов И.А., Дианов Ф.А. Статистические оценки сопротивления резанию и копанью грунтов землеройными машинами // Строительные и дорожные машины. – 1979. – № 9. – С. 20–22.

3. Недорезов И.А. Вариации прочности грунтов, разрабатываемых в строительстве // Транспортное строительство. – 2013. – № 8. – С. 29–30.

4. Растегаев И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве. – Новосибирск: ВО Наука, 1992. – 347 с.

5. Растегаев И.К. Фон эксплуатации систем землеройно-транспортных машин по территории СССР // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – 1974. – № 31. – С. 126–148.

6. Зеленин А.Н. Состояние и перспектива развития машин для разработки мерзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. – 1961. – № 10. – С. 7–9.

7. Сладкова Л.А., Жидков Н.Г. Разработка многолетнемерзлых грунтов: монография / под общ. ред. Л.А. Сладковой. – Балашиха, 2009. – 96 с.

8. Васильев С.И., Иванчура В.И., Ереско С.П. Вероятностные физико-механические характеристики грунтов Восточно-Сибирского региона // Транспортное строительство. – 2013. – № 3. – С. 28–30.

9. Анферов В.Н., Васильев С.И., Кузнецов С.М. Обоснование надежности работы строительных машин: монография / Сибир. федер. ун-т, Ин-т нефти и газа. – Красноярск, 2014. – 164 с.

10. Васильев С.И. Повышение эффективности разработки сезонномерзлых грунтов // Вестник Том. гос. арх.-строит. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 194–200.

11. Разработка сезонномерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами: монография / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин, Б.В. Осипенко. – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. – 140 с.

12. Васильев С.И., Ереско С.П., Жубрин В.Г. Эффективность использования траншейных экскаваторов для разработки мерзлых грунтов // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 5 (21). – С. 10–18.

13. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов, С.Е. Городецкий, В.Ф. Ермаков, А.Е. Зацарская, Н.К. Пекарская. – М.: Наука, 1966. – 350 с.

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высш. шк., 1979. – 272 с.

15. Васильев С.И., Ереско С.П. Исследование процесса резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными рабочими органами // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 8. – С. 145–153.

16. Васильев С.И. Методология прогнозирования эффективности использования траншейных экскаваторов для разработки мерзлых грунтов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / СПбГАСУ. – СПб., 2014. – 38 с.

References

1. Nedorezov I.A. Prognozirovanie trudnosti razrabotki gruntov zemleroinymi mashinami [Prediction difficulties excavation digging machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2008, no. 4, pp. 43-44.

2. Nedorezov I.A., Dianov F.A. Statisticheskie otsenki soprotivleniia rezaniiu i kopaniiu gruntov zemleroinymi mashinami [Statistical evaluation of resistance to cutting and digging of soil digging machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 1979, no. 9, pp. 20-22.

3. Nedorezov I.A. Variatsii prochnosti gruntov, razrabatyvaemykh v stroitel'stve [Variations of soil strength developed in the construction]. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2013, no. 8, pp. 29-30.

4. Rastegaev I.K. Razrabotka merzlykh gruntov v severnom stroitel'stve [Development of frozen soils in the northern building]. Novosibirsk: VO Nauka, 1992. 347 p.

5. Rastegaev I.K. Fon ekspluatatsii sistem zemleroino-transportnykh mashin po territorii SSSR [Operating systems earthmoving machines on the territory of the USSR]. *Stroitel'stvo v raionakh Vostochnoi Sibiri i Krainego Severa*, 1974, no. 31, pp. 126-148.

6. Zelenin A.N. Sostoianie i perspektiva razvitiia mashin dlia razrabotki merzlykh gruntov [Status and prospects of development of machines for frozen ground excavation]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 1961, no. 10, pp. 7-9.

7. Sladkova L.A., Zhidkov N.G. Razrabotka mnogoletnemerzlykh gruntov [Development of permafrost]. Balashikha, 2009. 96 p.

8. Vasil'ev S.I., Ivanchura V.I., Eresko S.P. Veroiatnostnye fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki gruntov Vostochno-Sibirskogo regiona [Probability of physical and mechanical characteristics of the East-Siberian region of soil]. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2013, no. 3, pp. 28-30.

9. Anferov V.N., Vasil'ev S.I., Kuznetsov S.M. Obosnovanie nadezhnosti raboty stroitel'nykh mashin [Justification of the reliability of the construction machinery]. Krasnoiarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, Institut nefti i gaza, 2014. 164 p.

10. Vasil'ev S.I. Povyshenie effektivnosti razrabotki sezonnomerzlykh gruntov [Improving the efficiency of the development of seasonally frozen ground]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2010, no. 1, pp. 194 - 200.

11. Vasil'ev S.I., Eresko S.P., Zhubrin V.G., Osipenko B.V. Razrabotka sezonnomerzlykh gruntov Vostochnoi Sibiri transheinyymi ekskavatorami [Development of seasonally frozen soils of Eastern Siberia trench excavators]. Krasnoiarsk: IPK SFU, 2010. 140 p.

12. Vasil'ev S.I., Eresko S.P., Zhubrin V.G. Effektivnost' ispol'zovaniia transheinykh ekskavatorov dlia razrabotki merzlykh gruntov [Efficiency use trenchers for frozen ground excavation]. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*, 2015, no. 5 (21), pp. 10-18.

13. Vialov S.S., Gorodetskii S.E., Ermakov V.F., Zatsarskaia A.E., Pekarskaia N.K. Metodika opredeleniia kharakteristik polzuchesti, dlitel'noi prochnosti i szhimaemosti merzlykh gruntov [Methods of determining the characteristics of the creep rupture strength and compressibility of frozen ground]. Moscow: Nauka, 1966. 350 p.

14. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 272 p.

15. Vasil'ev S.I., Eresko S.P. Issledovanie protsessa rezaniia merzlykh gruntov s graviino-galechnikovymi vklucheniiami roturnymi rabochimi organami [Research of process of cutting of frozen soils with gravel and pebble inclusions rotary working bodies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2010, no. 8, pp. 145-153.

16. Vasil'ev S.I. Metodologiya prognozirovaniia effektivnosti ispol'zovaniia transheinykh ekskavatorov dlia razrabotki merzlykh gruntov [Methodology for predicting the effectiveness of the use of trench excavators for frozen ground excavation]. Saint Petersburg, 2014. 38 p.

Получено 25.11.2016

Об авторах

Жубрин Владимир Георгиевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин», Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева (660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: v2551439@gmail.com).

Ереско Сергей Павлович (Красноярск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин», Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева (660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31).

Васильев Сергей Иванович (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Сибирский федеральный университет (660041, г. Красноярск, Свободный пр., 79, e-mail: s-vasilev1@yandex.ru).

About the authors

Vladimir G. Zhubrin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machine Design Basics, Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (31, Krasnoyarskii Rabochii av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, e-mail: v2551439@gmail.com).

Sergei P. Eresko (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Machine Design Basics, Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (31, Krasnoyarskii Rabochii av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation).

Sergei I. Vasil'ev (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Drilling Oil and Gas Wells Department, Siberian Federal University (79, Svobodnyi av., 660041, Krasnoyarsk, e-mail: s-vasilev1@yandex.ru).